

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430055

# 多级分阶段动荷载作用下饱和软黏土 变形特性的研究\*

李哲瀚<sup>1</sup>, 咸甘玲<sup>1</sup>, 兰景岩<sup>2,3</sup>, 骆超荣<sup>1</sup>, 莫红艳<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004;  
3. 燕山大学深圳研究院, 广东 深圳 518063)

**摘要:** 为探讨饱和软黏土在多级循环荷载作用下的动力特性和累积变形规律, 利用多级分阶段循环动三轴试验模拟“前-主-余”序列型地震动荷载, 研究分析了间歇性组合循环应力比、加载频率及破坏振次对饱和软黏土变形和强度特性的影响, 并据此提出一种多因素影响的多级分阶段动荷载作用下的软黏土累积塑性应变发展的数学模型。研究表明: 动荷载施加初期软黏土的动强度由于振动压实而提高, 同时加剧了破坏时的结构损伤, 导致残余强度降低; 受主余震型循环应力比的影响, 软黏土在多级分阶段动荷载作用下的累积变形会呈现出稳定型、发展型和破坏型三种不同形态; 前主震型动荷载作用下软黏土的动强度随加载频率的增大而降低, 余震动荷载作用下软黏土的动强度受加载频率与破坏振次的共同影响。本研究建立了以破坏振次为主要拟合参数的软黏土变形预测模型, 可为序列型地震动荷载作用下的岩土体累积变形发展和稳定性评价提供工程参考。

**关键词:** 软黏土; 间歇循环荷载; 破坏振次; 累积塑性变形

**中图分类号:** TU 435; TU 447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1515-10

## Study on Deformation Characteristics of Saturated Soft Clay under Multi-level Staged Dynamic Loads

LI Zhehan<sup>1</sup>, XIAN Ganling<sup>1</sup>, LAN Jingyan<sup>2,3</sup>, LUO Chaorong<sup>1</sup>, MO Hongyan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. School of Civil Engineering & Mechanics Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Shenzhen Research Institute of Yanshan University, Shenzhen 518063, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic characteristics and cumulative deformation behavior of saturated soft clay under multi-level cyclic loading, a multi-level staged cyclic dynamic triaxial test was used to simulate the Foreshock-Mainshock-Aftershock sequential seismic loading. The effects of intermittent combined cyclic stress ratio, loading frequency, and the number of cycles to failure on the deformation and strength characteristics of saturated soft clay were studied and analyzed. On this basis, a mathematical model describing the development of cumulative plastic strain of soft clay under multi-level staged dynamic loading, incorporating multiple influencing factors, was proposed. The research results indicated that the dynamic strength of soft clay increased during the initial stage of dynamic load-

\* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52368068, 52168067)资助

作者简介: 李哲瀚(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事软土动力特性方面的研究。E-mail: 1305796907@qq.com

通信作者: 兰景岩(1981—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: lanjy1999@163.com

ing due to vibration-induced compaction, while the structural damage during failure was intensified, leading to a reduction in residual strength. Under the influence of the mainshock-aftershock type cyclic stress ratio, the cumulative deformation of soft clay under multi-level staged dynamic loading exhibited three different patterns: stable, progressive, and failure types. Under the foreshock-mainshock type dynamic loading, the dynamic strength of soft clay decreased with increasing loading frequency, whereas under aftershock loading, it was jointly affected by both loading frequency and the number of cycles to failure. A deformation prediction model for soft clay, using the number of cycles to failure as the main fitting parameter, was established in this study. The model provides an engineering reference for evaluating the development of cumulative deformation and the stability of geomaterials under sequential seismic dynamic loading.

**Keywords:** soft clay; intermittent cyclic loading; number of cycles to failure; cumulative plastic deformation

## 0 引言

饱和软黏土在循环动荷载作用下的强度特性问题一直是国内外学者广泛关注的研究领域<sup>[1]</sup>。当前最常用且被认为是最可靠的研究手段依然是室内动荷载试验,其中振动三轴试验系统是最广泛采用的技术手段之一。在此背景下,基于荷载施加的时间序列特征,相关研究大致可分为两类体系:(1)连续循环荷载试验:以往的研究较多地关注了围压、循环动应力、静偏应力、频率及波形等因素对饱和软黏土的影响<sup>[2-5]</sup>。对于黏粒含量、非均质土及改良土、变化的围压以及主应力旋转等影响因素的探讨相对较少<sup>[6-9]</sup>。(2)间歇循环荷载试验:在这类试验中,土体首先经历一定次数的循环荷载,随后进入一个停振期,之后再次施加循环荷载时表现出与连续循环荷载不同的动力特性。当前,这类试验主要用于探讨地铁、高铁等交通荷载引起的地基长期稳定沉降的动力特性<sup>[10-13]</sup>。

软土在地震作用下一般在短时间内会产生较大变形,甚至发生结构性破坏<sup>[14]</sup>,这与交通荷载下的土体变形有显著区别。现有的大量动三轴试验主要集中在连续循环荷载<sup>[15]</sup>或动静组合<sup>[16]</sup>加载条件下土体的破坏行为研究,针对序列型循环荷载的研究相对较少,特别是关于结构性软黏土破坏后再次承受循环荷载效应的研究更是寥寥无几。前震被认为是预测强震的一个极为有效的指标之一<sup>[17]</sup>,而在多次余震作用下产生的余震增量损伤同样不可小觑<sup>[18-19]</sup>。基于此背景,本文利用循环三轴试验平台,探讨了饱和软黏土在三种不同试验工况,以模拟“主-余震型”、“前震型”及“前-主-余型”三种不

同地震序列条件下的动力特性,特别是在间歇性循环加载条件下土体达到破坏标准后的动力特性演变规律。此外,本文还提出了一种用于预测土体结构破坏后应变进程的数学模型,旨在为评估和预测地震中软土层的行为提供理论依据和技术支持。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设备

本文动力试验采用 DDS-70 微机控制电磁式振动三轴,采用单向等幅应力控制加载方式。该设备的闭环自动控制振动系统的特点为出力要求不大、频率要求较高、响应快。适用于进行土的动强度、动弹模试验以及土的循环荷载试验,在试验过程中,微机系统全程控制试验进程和对试验数据的记录。

### 1.2 试验土样

试验土样为产自澳大利亚的 IMERYS 益瑞石牌水洗高岭土,进行按照 1:0.65(土:水)的含水率混合制备泥浆。采用堆载预压法制作试样,所用的试样箱为可拆卸制样模具,模具内尺寸为(20×20×20) cm。出于对土水拌和均匀、装样过程中材料的损耗以及土层厚度对固结过程影响的考虑,按初始土层高度 16 cm 计算所需土与蒸馏水质量,每箱土共需 6 500 g 土和 4 230 g 水,在向干土加水过程中用搅拌机不断搅拌,使其充分搅拌均匀至泥浆状,再用塑料薄膜封闭保湿静置 12 h。配置土装箱前再次搅拌,为保证试样均匀性。充分搅拌后,分 4 层装箱,每层加完通过不断振捣减少泥浆中气泡数量,

添至 16 cm 时盖上承压板,随后进行堆载预压。当箱中土样沉降至 13 cm 时达到稳定,当卸载完成即可拆卸模具,得到泥浆沉降法重塑土,使用直径 0.1 mm 钢丝对土样进行分割为边长 5 cm×5 cm×13 cm 长方体试样,每箱可制作 16 个标准三轴试样。随后进行抽真空饱和,进行试验前先测试饱和度,若未达到 95% 则需要反压饱和。确保沉降稳定持续地进行以及防止过快卸载导致的土体弹性回弹和不均匀沉降,并保持土体处于湿润状态,加卸荷序列见表 1,总耗时 20 d,最大竖向压力 25 kPa。重塑高岭土的基本物理参数见表 2。

表 1 堆载预压加卸荷序列

Table 1 Loading and unloading sequence for surcharge preloading

天数/d	加卸荷载/ kg	累积荷载/ kg	累积竖向压力/ kPa
1-5	每天增加 5.1	25.5	6.3
2-11	每天增加 10.2	86.7	21.5
12	增加 15.3	102	25.0
13-17	—	102	25.0
18-20	每 2 h 卸载 10.2	0	0

表 2 重塑高岭土的基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of remolded kaolin

密度 $\rho$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	平均 粒径/ um	含水率 $\omega$ / $\%$	孔隙 比 $e$	$W_L$ / $\%$	$I_p$	饱和 重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	$C_v^*$ / ( $mm^2 \cdot s^{-1}$ )
1.68	0.6	46.4	1.2	45.2	21.7	16.5	1.268

### 1.3 试验方案

前震泛指主震之前、在主震附近发生的小地震,时间分布主要在主震前数分钟到数天,且随主震震级的增大,有前震的比例也逐渐增大,但两者之间并无明显的震级对应关系<sup>[20]</sup>。主震过后往往会伴随着大量的余震,时间分布主要在主震后数分钟到几十年内<sup>[21]</sup>。考虑到时间成本,参考尼泊尔地震<sup>[22]</sup>中首次主余震间隔时间作为本次试验的停振阶段时长,试验选择以 1 800 s 作为间歇时长。从强度、分布时间跨度以及数量来看,余震的潜在危害大于前震,同时考虑仪器性能的限制,试验阶段停振条件采用应变和振次双控指标,试验阶段停振条件为:第一阶段用于模拟前震,振动次数 50 次或轴向应变达到 2%;在前期试验中已知试样应变破坏

标准不大于 3%,为确保试样均能达到破坏标准和获得更多数据,第二阶段用于模拟主震,停振条件为振动次数达到 500 次或轴向应变达到 3.5%;第三阶段用于模拟余震,停振条件则设定为振动次数达到 1 000 次或轴向应变达到 5%,以上三个阶段的停振条件以先到达者为准。

因实际地震波频率范围宽广,从低频的数赫兹到高频的几十赫兹均有分布,本试验选取 1、3、5 Hz。试验循环加载序列如图 1 所示,具体试验加载方案如表 3 所示,共计 25 组动三轴平行试验。

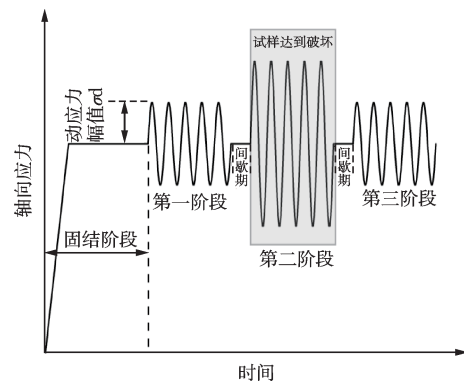


图 1 分阶段循环加载序列

Fig.1 Staged cyclic loading sequence

表 3 动三轴试验方案

Table 3 Dynamic triaxial test scheme

试验 工况	围压 $\sigma_3$ / kPa	频率/ $k_c$ Hz	CSR			波形
			第一 阶段	第二 阶段	第三 阶段	
工况一	111	1	—	0.14	0.1	正 弦 波
			0.117	0.15	0.13	
			0.16	0.16	0.18	
			0.09	0.14	0.1	
工况二	111	1	0.108	0.16	—	正 弦 波
			0.117	0.17	0.135	
			0.18	0.18	0.14	
			0.15	0.14	0.1	
工况三	111	1	0.1	0.155	0.1	正 弦 波
			0.16	0.16	0.17	
			0.17	0.17	0.18	
			0.18	0.18	0.18	

注: CSR=0.1 表示第一次施加荷载 CSR=0.1 的数据; CSR=0.1-0.15 表示第二次施加荷载 CSR=0.15 的数据; CSR=0.1-0.15-0.1 表示第三次施加荷载 CSR=0.1 的数据

## 2 试验结果分析

### 2.1 主余震型塑性累积变形

为了系统地比较和分析不同加载阶段累积塑性应变的增长特征,将每个加载阶段的初始塑性应变水平设定为零,为深入探讨加载历程中土体塑性响应的阶段性演变规律与机制提供了清晰的量化基础。

图2为主余震下的累积塑性应变发展曲线,图2(a)至(d)为主震阶段CSR不同,余震阶段相同CSR的累积塑性应变曲线。在主震阶段中,其轴向应变发展速率随CSR的增大而增大,达到应变停止条件所需振次随CSR增大而减少。余震阶段在相同的CSR荷载条件中,可将累积塑性应变曲线分为两个阶段,第一阶段为施加循环荷载初期,即前10振次左右,轴向应变随振次呈现出指数型发展曲线。随后进入第二阶段,应变发展速率显著减缓,随着振次的增加,该阶段可能再出现应变拐点,如图2(a)所示振次100次左右时;轴向应变也可能在振次为10次后趋于稳定,如图2(d)。

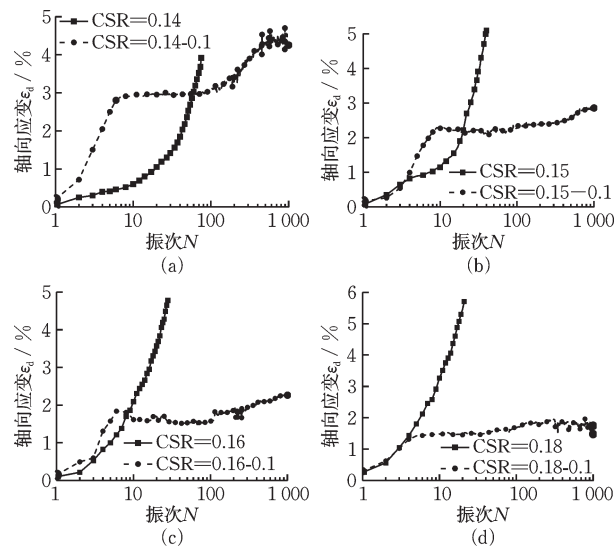


图2 主余震型下的轴向应变—振次关系曲线

Fig.2 Axial strain-vibration cycle relationship curves under mainshock-aftershock type

进一步可看出,余震第一阶段轴向应变值随主震阶段的CSR减小而增大;余震第二阶段出现应变拐点的明显程度与总轴向应变随主震阶段的CSR减小而增大,如图3(a)所示。图3(b)展示了三组主

震CSR相同而余震阶段CSR不同的轴向应变—振次,相同形状的曲线为同一试样的两个阶段数据,其中黑色实心图形是主震阶段变形曲线,黑色空心图形是余震阶段变形曲线。图中标识了两个关键区域:区域1为主震阶段出现的应变拐点,即三个试样达到破坏标准时所需振次基本相同。区域2为余震阶段两个阶段的过渡区,第一阶段的应变值基本在同一水平,该阶段应变主要产生于主震破坏程度以及裂隙不可逆损伤;第二阶段的应变发展则主要与余震动荷载参数以及历史荷载有关。

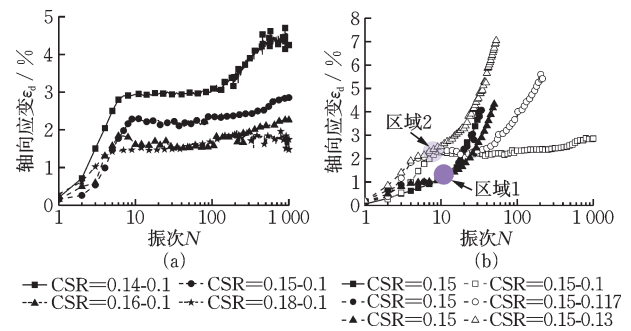


图3 不同序列荷载下的轴向应变—振次关系对比

Fig.3 Comparison of axial strain-vibration cycle relationships under different sequential loads

### 2.2 前主震型塑性累积变形

图4(a)~(d)为前震阶段CSR不相同,主震阶段CSR相同条件下的前50次振次下的轴向应变—振次。从图可看出,前震阶段的50次循环荷载,轴向应变随CSR增大而增加,并在较少振次后应变达到相对稳定,在本阶段均未出现应变拐点。相较于主余震型,经过前震振动压实和间歇期再固结,前主震型的主震阶段在前50次循环荷载作用中未出现应变拐点。

从图4(e)、(f)可知前震阶段在不同CSR条件下的应变稳定状态有所不同,轴向应变均随前震阶段的CSR增大而增大,尽管前震阶段表现出的是稳定型发展曲线,但由前期试验结果可知,当 $\sigma_3=111$  kPa时临界循环应力比在CSR位于0.1~0.12的区间内。具体而言,CSR值为0.117、0.108和0.1的情况下都有可能造成土体破坏,只是振次50次未到达破坏振次 $N_f$ ,因此对土体振动压实的过程同时伴随着土体颗粒重组和结构损伤的发展。

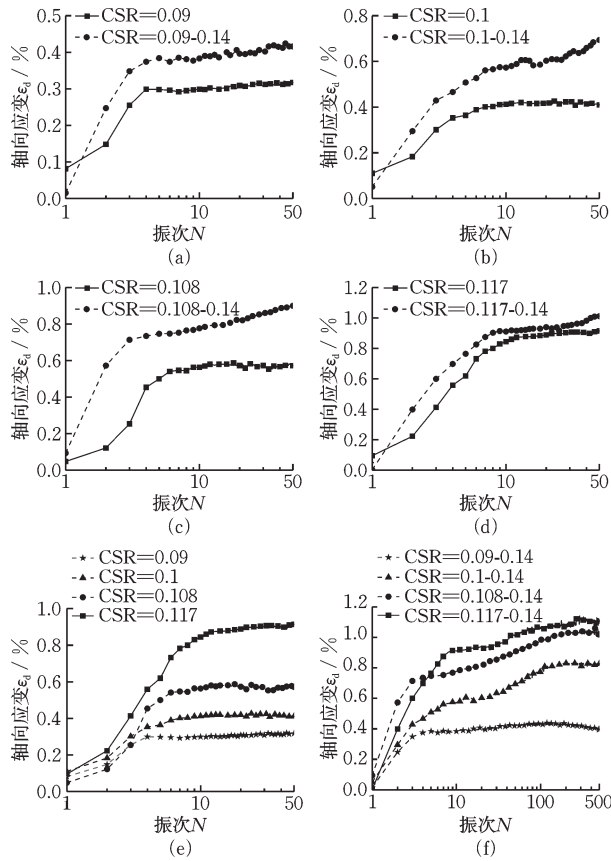


图4 前主震型下的轴向应变—振次关系曲线

Fig.4 Axial strain-vibration cycle relationship curves under foreshock-mainshock type

### 2.3 前主震型塑性累积变形

图5~图7分别是频率为1、3、5 Hz的前主余震型下的主震阶段和余震阶段累积塑性应变曲线,其中黑色方形为主震阶段轴向应变数据点,黑色圆形为余震阶段轴向应变数据点。相较于同时考虑主震和余震的试验结果,前主余震型因受前震阶段压实作用,使土体结构达到更均匀的状态,在余震阶段的轴向应变的发展波动相对更小。同时前主余震型中的余震阶段也存在两个应变发展阶段:轴向应变在前10次振次内表现出指数型增长特征,此后,应变的发展受到主震阶段循环应力比和加载频率的影响,表现出不同的应变发展趋势。

由图8(a)可知,在相同荷载序列下,频率1~5 Hz范围内,主震阶段的土体动强度随频率的增大而降低,即频率越大达到破坏标准所需振次越少。此外在不同频率下的破坏应变水平基本一致,如图8(a)虚线所示,说明在该频率区间内,循环应力比是决

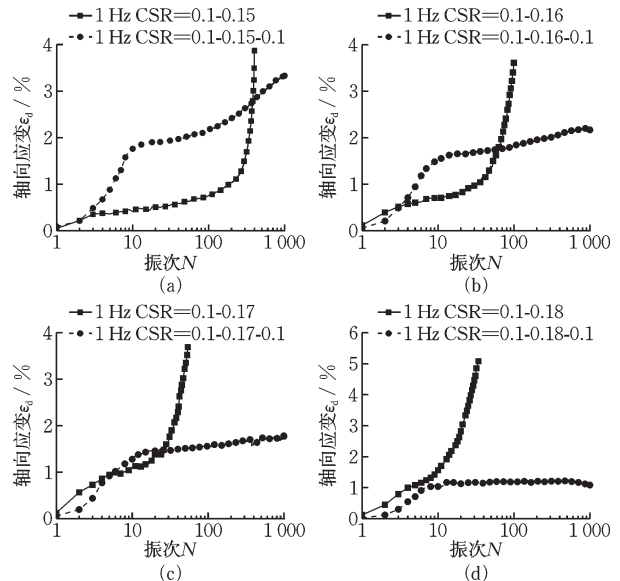


图5 振动频率1 Hz条件下的前主余震型累积塑性应变曲线关系

Fig.5 Cumulative plastic strain curves of foreshock-mainshock-aftershock type at vibration frequency of 1 Hz

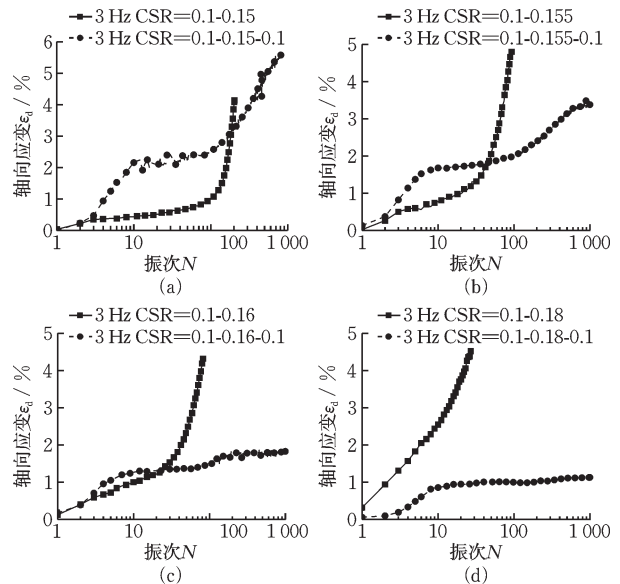


图6 振动频率3 Hz条件下的前主余震型累积塑性应变曲线关系

Fig.6 Cumulative plastic strain curves of foreshock-mainshock-aftershock type at vibration frequency of 3 Hz

定土样破坏应变的关键因素,而频率的影响则相对次要。而在余震阶段,在CSR=0.1-0.15-0.1荷载序列中,不同频率条件下,3 Hz产生的变形量最大,其次是5 Hz,变形量最小的是1 Hz;而在CSR=0.1-0.16-0.1荷载序列中,1 Hz产生的变形量最大,其次是3 Hz,变形量最小的是5 Hz,如图8(b)、(c)所示。

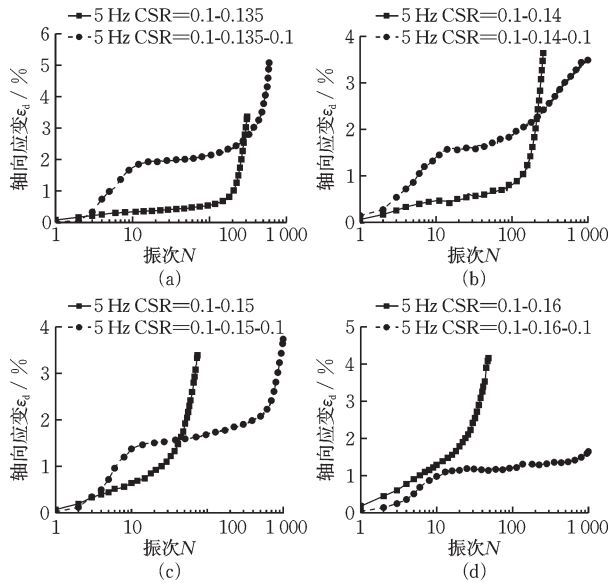


图7 振动频率5 Hz条件下的前主余震型累积塑性应变曲线关系

Fig.7 Cumulative plastic strain curves of foreshock-main-shock-aftershock type at vibration frequency of 5 Hz

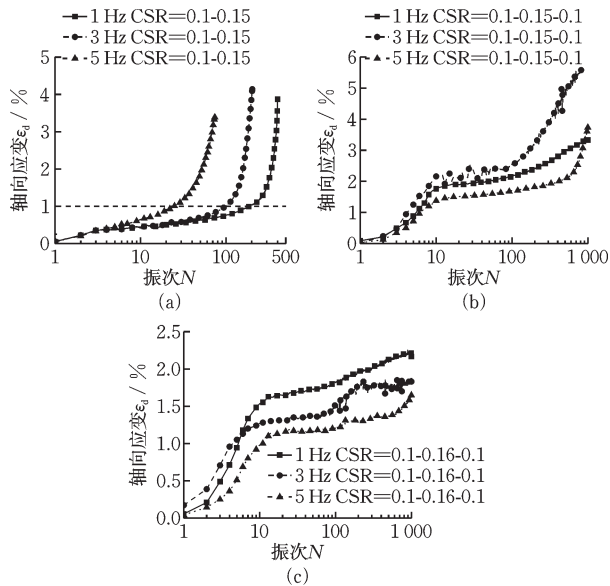


图8 频率1、3、5 Hz在相同荷载序列下的累积塑性应变曲线关系

Fig.8 Cumulative plastic strain curves at frequencies 1, 3, and 5 Hz under same load sequence

本文通过沈珠江<sup>[23]</sup>提出的堆砌体模型来解释主震阶段破坏振次对土体后续强度的影响。沈珠江提出结构性软黏土颗粒之间的胶结强度分布不均,存在胶结比较弱的面或带,如像砖墙的灰缝或岩石的节理,荷载增大到一定程度后,薄弱处先发生破损,如像砖墙先沿灰缝发生裂缝一样。然而经过前震阶段或是破坏振次之前的振动压实,土颗粒

能够有效填补孔隙,尤其是那些最脆弱的连接部位得到了显著强化,这不仅提升了薄弱处的局部强度,而且大幅减少了其与较坚固区域之间的强度差距。因此,达到破坏振次时,土体内部形成的裂缝更为密集,破裂过程更加剧烈,导致土体更容易分裂成更小的碎片。

## 2.4 间歇循环荷载作用下的动强度

图9为不同荷载序列作用下以轴向应变拐点  $\varepsilon_{ip}$  作为破坏标准的动强度曲线。从图可知,在经过前震振实和排水再固结,各频率下的前主余震型的动强度均大于主余震型,其中在频率为1 Hz,  $10 < N_f < 100$  范围,主余震型中的主震阶段和余震阶段的抗剪强度分别为前主余震型中对应阶段的79.38%和73.72%。在前主余震型中土体动强度随频率的增加而降低,且频率越高,强度下降的幅度越小,1 Hz增长到3 Hz,强度下降了约6.46%;而从3 Hz增长到5 Hz,强度下降了约3.57%。

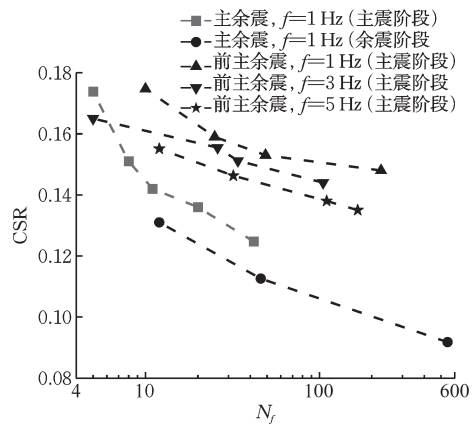


图9 不同震型作用下的强度曲线

Fig.9 Strength curves under different earthquake types

## 3 塑性累积应变计算模型

在余震阶段(或是土体达到破坏标准后),应变表现最为突出的特征之一是在较低水平循环应力比条件下,振次10次左右以指数型形式迅速发展至较大应变水平。进一步观察发现,在相同CSR条件下,余震阶段的应变发展模式可以分为稳定型、发展型、破坏型三种类型,相比于以往研究内容在相同CSR作用条件下基本按照某一类型发展趋势发展更为复杂。为此,本研究建立了估算余震第一阶段中第10次振次对应的应变值的表达式,并提出双

指数型计算模型用于模拟整个余震阶段应变发展趋势。

主震阶段的破坏振次  $N_f$  与余震阶段振次 10 次所对应的轴向应变关系如图 10(a) 所示。由图可知,主余震荷载序列条件下,不同主震 CSR 所对应的余震阶段 10 周振次未出现明显的应变增长速率减缓。前主余震型荷载序列条件下,随着主震 CSR 的减小,破坏振次的增加,余震阶段 10 周振次的轴向应变增长速率显著减缓,且频率 3 Hz 减缓程度小于 1、5 Hz。通过幂函数  $\epsilon_d = aN_f^b$  可较好地拟合主震阶段的破坏振次与余震阶段第一阶段应变的关系。前主余震型 a、b 与频率关系符合二次函数分布规律,如图 10(b) 所示。

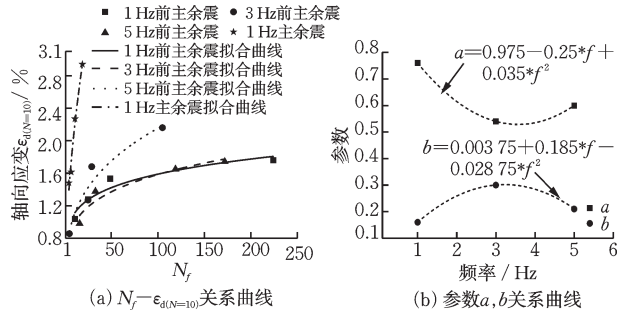


图 10 主震阶段破坏振次  $N_f$  与余震阶段振次 10 次应变关系曲线

Fig.10 Relationship curves between number of cycles to failure ( $N_f$ ) in mainshock stage and axial strain at 10<sup>th</sup> cycle in aftershock stage

以上分析建立主震阶段不同破坏振次  $N_f$  和不同频率  $f$  下的余震第一阶段  $\epsilon_{d(N=10)}$  的计算表达式:

$$\epsilon_{d(N=10)} = (0.975 - 0.25 \cdot f + 0.035 \cdot f^2) \cdot (N_f)^{(0.004 + 0.185 \cdot f - 0.029 \cdot f^2)} \quad (1)$$

依据式(1),可以估算土体达到破坏标准后,再固结尚未达到稳定时,在承受不超过其破坏前的临界循环应力比且振动次数较少条件下的轴向应变。这种方法为预测余震作用下土体变形提供了重要的参考依据。

以往的循环荷载作用下的残余应变计算模型主要有半对数函数<sup>[24]</sup>、指数函数<sup>[25]</sup>、双曲线型函数<sup>[26]</sup>和幂指数函数<sup>[27]</sup>等,但现有的模型主要用于研究单次连续循环荷载,或者是模拟交通荷载间歇应变稳定型发展,对于土体破坏后的间歇塑性累积变形函数鲜有研究。为此,依据本次试验结果本文提出了一种双指数形式的土体轴向应变的预测模型,如

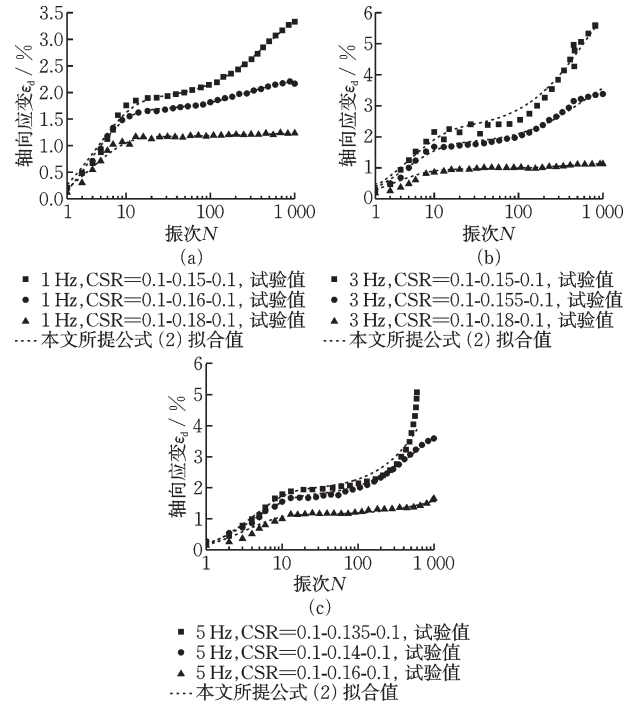


图 11 各震型条件下余震阶段轴向应变拟合曲线  
Fig.11 Fitted axial strain curves in aftershock stage under different earthquake types

式(2)所示,拟合结果如图 11 所示。

$$y = y_0 + A_1 \cdot (1 - e^{-N/t_1}) + A_2 \cdot (1 - e^{-N/t_2}) \quad (CSR=0.1) \quad (2)$$

式中,  $y_0$  为轴向应变初始值或基线值;  $A_1$ 、 $A_2$  表示两个不同过程的指数增长函数的振幅,即各自指数增长过程相对于基线  $y_0$  的最大贡献;  $t_1$ 、 $t_2$  分别对应两个指数项的时间常数,决定了每个指数项发展速度,各试验条件下参数值如表 4 所示。

从表 4 可以看出,频率和主震阶段 CSR 对拟合参数的影响显著。具体而言,在频率 1 Hz 和 3 Hz 条件下,各参数随主震阶段  $N_f$  具有较好的发展一致性;而频率 5 Hz 条件下,  $y_0$ 、 $A_1$ 、 $t_1$  与主震阶段  $N_f$  关系曲线与 1 Hz 和 3 Hz 相似,但  $A_2$  和  $t_2$  发展曲线与 1 Hz 和 3 Hz 的发展曲线则显示出明显的差异。

通过对不同频率下的主震阶段破坏振次  $N_f - y_0$  的关系曲线  $y_0 = b_1 N_f^{c_1}$  进行分析,再分析参数  $b_1$ 、 $c_1$  在各频率下的数值进行分析,  $b_1$ 、 $c_1$  参数见表 5,其中  $b_1$  与频率呈现线性关系,  $c_1$  取各频率下的平均值。最终得到参数  $y_0$  与频率、主震阶段破坏振次  $N_f$  间的关系式:

$$y_0 = (0.078 \cdot f - 0.486) N_f^{0.176} \quad (3)$$

由于  $A_1$  与式(1)  $\epsilon_{d(N=10)}$  的计算值均是表征第一个指数增长趋势,且两参数发展规律相近,通过引

表 4 经验公式拟合相关参数

Table 4 Parameters obtained from empirical formula fitting

分级加载序列	频率/Hz	$y_0$	$A_1$	$t_1$	$A_2$	$t_2$	$R^2$
CSR=0.1-0.15-0.1		-1.1	2.96	3.88	1.73	489.7	0.99
CSR=0.1-0.16-0.1	1	-0.96	2.61	3.63	0.58	298.0	0.99
CSR=0.1-0.18-0.1		-0.58	1.75	3.54	0.06	266.0	0.91
CSR=0.1-0.15-0.1		-0.5	2.7	5.05	5.8	875.8	0.98
CSR=0.1-0.155-0.1	3	-0.45	2.2	4.57	2.2	572.0	0.97
CSR=0.1-0.18-0.1		-0.28	1.23	3.23	0.2	405.3	0.92
CSR=0.1-0.135-0.1		-0.3	2.2	4.32	7.1	1 825.5	0.84
CSR=0.1-0.14-0.1	5	-0.19	1.88	4.41	2.38	619.4	0.99
CSR=0.1-0.16-0.1		-0.18	1.36	3.40	0.66	903.9	0.92

表 5 不同频率下  $N_f-y_0$  计算参数

Table 5 Calculation parameters of  $N_f-y_0$  at different frequencies

频率 $f$ /Hz	$b_1$	$c_1$
1	-0.424	0.182
3	-0.221	0.182
5	-0.112	0.164

入修正系数  $C$ , 将式(1)带入式(2)。  $C$  值则取两参数倍数的平均值, 频率 1、3、5 Hz 的  $C$  值分别约为 1.70、1.35、1.23。最终得到参数  $A_1$  与频率、主震阶段破坏振次  $N_f$  间的关系式:

$$A_1 = C\epsilon_{d(N=10)} \quad (4)$$

采用与  $y_0$  相同的分析方法对参数  $t_1$ 、 $A_2$ 、 $t_2$  进行分析。得到参数  $t_1$ 、 $A_2$ 、 $t_2$  与主震阶段破坏振次  $N_f$  间的关系曲线, 见表 6。

为验证上述模型参数计算的有效性, 对未参与参数拟合计算的三组不同频率、序列荷载的动三轴

表 6 不同频率下  $N_f-t_1$ 、 $A_2$ 、 $t_2$  计算参数

Table 6 Calculation parameters of  $N_f-t_1$ ,  $A_2$ , and  $t_2$  different frequencies

模型参数	关系曲线	频率/Hz	$d_1$	$g_1$
$t_1$	$t_1 = d_1 N_f^{g_1}$	1	3.22	0.033
		3	2.61	0.144
		5	2.70	0.096
$A_2$	$A_2 = d_1 N_f + g_1$	1	0.007 4	0.091 5
		3	0.055 4	0.110 1
$t_2$	$t_2 = d_1 N_f + g_1$	5	0.039 1	-0.371 5
		1	1.05	251.46
		3	4.66	397.10
		5	4.98	638.07

试验进行了对比分析, 包括试验值、试验拟合值以及通过式(2)的计算值。通过对比图 12 与图 13 可以发现, 对于整个余震阶段, 尤其是前 10 振次下, 式(2)的拟合值和计算值均显著优于以往的研究模型。在 1 Hz 条件下计算值与试验值高度吻合; 频率在 3 Hz 和 5 Hz 条件下, 前 300 振次的计算值与试验值较吻合, 随着振次增加计算值与试验值出现偏差, 但式(2)拟合效果依然较好。

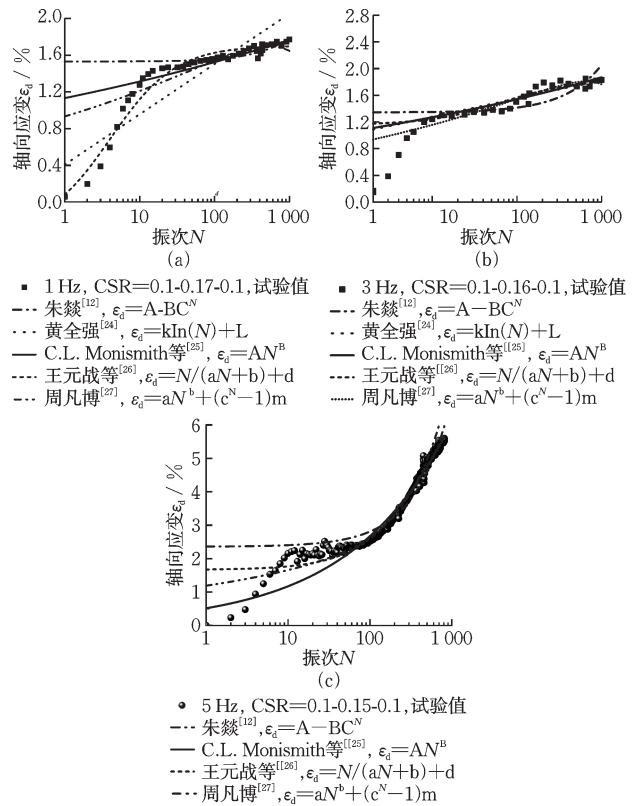


图 12 现有常见塑性累积拟合公式对余震阶段应变的拟合结果

Fig.12 Fitting results of aftershock-stage strain using commonly adopted cumulative plastic strain fitting formulas

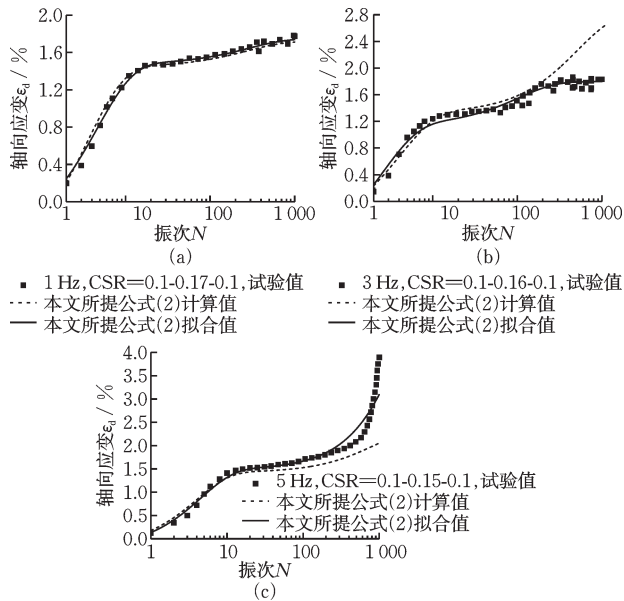


图13 各频率下的余震阶段轴向应变试验值、拟合值与计算值对比

Fig.13 Comparison of tested, fitted, and calculated axial strain values at each frequency in aftershock stage

## 4 结论

本文针对重塑饱和和软黏土开展了一系列多级分阶段动三轴试验,分析研究了间歇循环荷载、破坏振次和加载频率对饱和软黏土动力特性的影响,探讨了软黏土不同加载阶段的累积塑性变形发展规律,并建立了余震阶段的变形预测模型,主要结论如下:

(1) 动荷载初期,软黏土因振动压实作用密度提高,动强度随之增强;但随着荷载持续作用,压实过程会加剧土体结构的不可逆损伤。试验表明,压实效应越显著,土体破坏时的结构性劣化越严重,残余强度下降幅度也越大。

(2) 主震阶段循环应力水平对软黏土余震阶段的变形发展模式具有显著影响。随主震CSR增大,软黏土试样在相同余震荷载作用下的累积变形量逐渐减小,其轴向应变的发展模式依次表现为破坏型、发展型和稳定型三种典型形态。

(3) 在不同间歇序列荷载下,频率对饱和软黏土动强度有显著影响。前主震型动荷载作用下,软黏土在主震阶段的动强度随加载频率的增大而降低;前主余震型动荷载作用下,软黏土在余震阶段的动强度受加载频率与破坏振次的共同影响。

(4) 本研究建立了两个重要理论模型:主震阶段破坏振次与余震阶段的定量计算表达式;模型主要适用于描述土体在经历主震破坏、尚未完成再固

结稳定阶段,在较低应力比(如余震阶段 $CSR=0.1$ )的循环荷载作用下的累积应变。新建模型的拟合值和计算值均显著优于现有常见拟合公式的拟合结果。

本文以地震作用下土体失稳破坏为背景,建立了余震阶段累积变形的预测模型,但在多级分阶段循环荷载的间歇期内超静孔隙水压力的消散过程,本文由于试验条件和设备的限制没有做更深入细致的考虑。根据有效应力原理,超静孔隙的存在势必会减弱土体强度,使得土体在后续加载阶段更容易发生塑性变形。关于其与渗透系数变化及再固结变形机制之间的耦合效应,尚缺乏系统的理论支持和试验验证,有待在未来研究中进一步深化和完善。

## 参考文献:

- [1] 杨爱武,仲涛,张国军,等.循环荷载作用下结构性软黏土动力特性试验研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(1):44-50.  
Yang A W, Zhong T, Zhang G J, et al. Experimental study on dynamic behavior of structural soft clay under cyclic loading [J] Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1): 44-50. (in Chinese)
- [2] 张勇.武汉软黏土的变形特征与循环荷载动力响应研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008.  
Zhang Y. The deformation characteristics of Wuhan soft clay and its dynamic responses subjected to cyclic loading [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [3] Wang J, Cai Y, Yang F. Effects of initial shear stress on cyclic behavior of saturated soft clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2013, 31(1): 86-106.
- [4] Sağlam S, Bakır B S. Cyclic response of saturated silts [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61: 164-175.
- [5] 兰景岩,王延伟,曹振中,等.固结时间对软土动力特性影响的试验研究[J].震灾防御技术,2019,14(4):742-749.  
Lan J Y, Wang Y W, Cao Z Z, et al. Experimental investigation of consolidation time effects on dynamic characteristics of soft soils[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(4): 742-749. (in Chinese)
- [6] 李涛,唐小微.两种黏粒含量淤泥质粉质黏土动残余应变试验[J].岩土力学,2017,38(6):1609-1619,1628.  
Li T, Tang X W. Experiment on dynamic residual strain of two mucky silty clays with different clay contents[J]. Rock and soil Mechanics, 2017, 38(6): 1609-1619, 1628. (in Chinese)

- [7] Gedela R, Indraratna B, Nguyen T T, et al. The effect of biopolymer treatment on the potential instability of a soft soil under cyclic loading[J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 42: 101102.
- [8] Yang J, Cui Z D, Xi B, et al. Experimental study on cyclic triaxial behaviors of saturated soft soil considering time intermittent and variable confining pressure [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 179: 108508.
- [9] Wang Y, Gao Y, Li B, et al. One-way cyclic deformation behavior of natural soft clay under continuous principal stress rotation[J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(6): 1002-1013.
- [10] Liu Z, Xue J. The deformation characteristics of a kaolin clay under intermittent cyclic loadings[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 153: 107112.
- [11] 郑晴晴, 夏唐代, 张孟雅. 考虑间歇效应的循环荷载下软黏土刚度软化特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(11): 88-96.  
Zheng Q Q, Xia T D, Zhang M Y. Stiffness degradation of soft clay under cyclic loading considering intermittency effect[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(11): 88-96. (in Chinese)
- [12] 朱焱. 连续与间歇性动荷载作用下吹填土变形特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.  
Zhu Y. Study of deformation characteristics of dredger fill under continuous and intermittent dynamic loads[D]. Shanghai: Donghua University, 2022. (in Chinese)
- [13] Tong L, Xue W, Ding H. Influence of water content on clay deformation characteristics subjected to periodic intermittent loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 171: 107996.
- [14] 戚甘玲, 兰景岩, 李哲瀚. 软土地基桩基础抗震研究的若干进展与展望[J]. *应用力学学报*, 2024, 41(4): 729-741.  
Xian G L, Lan J Y, Li Z H. Advances and prospects of seismic research on pile foundations in soft soil[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2024, 41(4): 729-741. (in Chinese)
- [15] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(5): 764-768.  
Chen Y P, Huang B, Chen Y M. Reliability analysis of high level backfill based on chaotic optimization[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(5): 764-768. (in Chinese)
- [16] Zheng D, Tang L, Wang Y, et al. Dynamic stress accumulation effects on soil strength under cyclic loading [J]. *Soils and Foundations*, 2022, 62(4): 101164.
- [17] Jones L M, Molnar P. Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84 (B7) : 3596-3608.
- [18] Silwal B, Ozbulut O E. Aftershock fragility assessment of steel moment frames with self-centering dampers[J]. *Engineering Structures*, 2018, 168: 12-22.
- [19] Hatzigeorgiou G D, Liolios A A. Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(10): 1010-1025.
- [20] 周少辉, 蒋海昆. 前震研究进展综述[J]. *地震*, 2016, 36(3): 1-13.  
Zhou S H, Jiang H K. A comprehensive review of recent advances in foreshock research [J]. *Earthquake*, 2016, 36(3): 1-13. (in Chinese)
- [21] 蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1110-1117.  
Jiang H K, Qu Y J, Li Y L, et al. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese mainland [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1110-1117. (in Chinese)
- [22] Riga G, Balocchi P. Aftershocks identification and classification[J]. *Open Journal of Earthquake Research*, 2017, 6(3): 135-157.
- [23] 沈珠江. 结构性粘土的堆砌体模型[J]. *岩土力学*, 2000, 21(1): 1-4.  
Shen Z J. A masonry model for structured clays [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 1-4. (in Chinese)
- [24] 黄全强. 地震荷载作用下天津软土变形特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Huang Q Q. Study on deformation characteristics of soft soil in Tianjin under earthquake load [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [25] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. *Transportation research record*, 1975, 537: 1-17.
- [26] 王元战, 胡坤榕, 杨攀博. 循环荷载下滨海软粘土累积塑性应变试验研究[J]. *水道港口*, 2016, 37(3): 298-305.  
Wang Y Z, Hu S R, Yang P B. Experimental research on cumulative plastic strain of littoral soft clay under cyclic loading [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, 37(3): 298-305. (in Chinese)
- [27] 周凡博. 饱和软土的动力排水特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
Zhou F B. Study on dynamic drainage characteristics of saturated soft soil [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)